

激光修整金刚石砂轮研究进展

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2021.06.001

蔡 颂^{1,2,3} 张 阳² 龙赛琼⁴
刘文昊¹ 明兴祖¹

1. 湖南工业大学
机械工程学院
湖南 株洲 412007
2. 武昌工学院
绿色风机制造湖北省协同创新中心
湖北 武汉 430065
3. 华中科技大学
机械科学与工程学院
湖北 武汉 430074
4. 广州海关技术中心
广东 广州 510623

摘 要: 金刚石砂轮在磨削领域起着举足轻重的作用。对于失效金刚石砂轮的止损,合理地选择金刚石砂轮修整方法成为一大难题。激光修整技术集光、电、热、机械等多种方法于一体,能有效实现金刚石砂轮的修整,受到国内外学者的广泛关注。综合阐述了激光修整金刚石砂轮的基本原理,分析了激光修整技术研究现状,并展望了未来激光修整金刚石砂轮的发展前景。

关键词: 激光技术; 金刚石砂轮; 激光修整; 等离子体

中图分类号: TG74⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2021)06-0001-09

引文格式: 蔡 颂, 张 阳, 龙赛琼, 等. 激光修整金刚石砂轮研究进展 [J]. 包装学报, 2021, 13(6): 1-9.

0 引言

金刚石砂轮因其磨削性能优异、抗磨损能力强等特点,在工程陶瓷、玻璃钢、硬质合金等难加工材料的磨削加工中获得了广泛应用。但金刚石砂轮硬度极高,在加工修整上存在困难,一定程度上限制了金刚石砂轮的应用。因此,研发人员不断开发出多种修整金刚石砂轮的方法,部分金刚石砂轮修整方法的修整质量、修整效率和能耗的对比如表 1 所示。

采用普通砂轮磨削修整法、游离磨料研磨法^[1]等机械方法修整金刚石砂轮时,对小砂轮能起到修整的作用,但修整大颗粒砂轮时,存在修整效率低、操作环境恶劣、磨料损耗严重等缺点^[2-3]。电加工修

整法虽能实现高效精密修整,但成本较高,且容易形成热损伤。超声修整法修整质量好,但能耗较高,需要与其他修整方法联合使用才能达到理想的修整效果。激光修整金刚石砂轮,不仅修整效率高、质量可靠,而且经济效益可观。

表 1 部分金刚石砂轮修整方法对比
Table 1 Comparison of some diamond grinding wheel dressing methods

修整方法	修整质量	修整效率	能耗
磨削修整法	中	较高	较高
电加工修整法	优	较高	高
超声修整法	良	较高	较高
激光修整法	优	高	较高

收稿日期: 2021-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51705141, 51975192); 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40075, 2021JJ30214, 2021JJ50042); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队资助项目(T2020042); 湖北省高等教育学会专项课题教学改革研究基金资助项目(2021ZD54); 湖北省优势特色学科群开放基金资助项目(XKQ2021044)

作者简介: 蔡 颂(1982-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为激光加工与等离子体, E-mail: happy9918@sina.com

通信作者: 明兴祖(1964-), 男, 湖南临澧人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为激光精微加工理论与技术, E-mail: mxz9036@126.com

为满足修整需求,往往需要将多种方法进行有机整合。激光修整法是一门集激光技术、电加工技术、传感器技术及计算机技术于一体,多学科交叉的边缘学科和新兴的先进修整技术^[4-5]。具体方式就是将脉冲激光束照射在待修整的砂轮表面,砂轮朝着定向匀速旋转,通过控制激光参数使激光功率达到烧蚀阈值,获得理想的磨粒突出高度和一定的容屑空间,从而实现金刚石砂轮表面修整的目的。

不同激光对砂轮的作用效果有所不同,脉冲激光适于加工金属材料,主要用于修整砂轮表面,而连续激光适于加工非金属材料,更适用于切割材料及激光测距等^[6]。不同的激光加工参数对砂轮的作用效果也不同,如相同能量密度下,激光烧蚀低转速砂轮效果会比高转速的更剧烈,这是由于激光束在低转速砂轮表面停留的时间更长。因此,选择合适的激光器和激光参数,是获得理想修整效果的关键所在。只有在传统技术的基础上不断探索和研发新型修整技术,才能有效推动磨削技术的快速发展。

1 激光修整金刚石砂轮原理

因激光加工具有高加工效率、无损耗、非接触、易控制等特点^[7],对金刚石砂轮能够实现理想的修整效果。激光修整金刚石砂轮的原理图如图1所示。由图可知,利用金刚石与结合剂的烧蚀阈值不同,通过调节激光控制器的激光参数(如激光能量、砂轮旋转速度),将聚焦的高能量激光束照射在金刚石砂轮的表面,实现修整金刚石砂轮的目的^[8]。

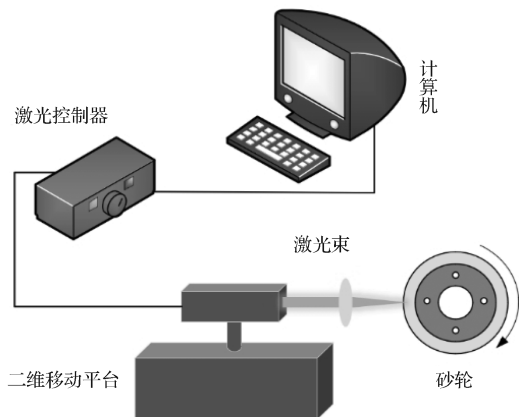


图1 激光修整金刚石砂轮原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser dressing diamond grinding wheel

修整金刚石砂轮可分为整形和修锐两个步骤,示

意图如图2所示。其中,整形是指切削金刚石砂轮使金刚石磨粒尖端发生轻微碎裂,形成锋利的磨削刃的过程^[9-10];整形过程中还可通过加大激光功率密度,使其达到金刚石砂轮的烧蚀阈值,同时去除金刚石磨粒和结合剂。修锐是指将激光功率控制在结合剂烧蚀阈值和金刚石烧蚀阈值之间,将金刚石磨粒间多余的结合剂去除,使之拥有一定的容屑空间,并且使磨粒突出于结合剂之外,获得理想的磨粒高度,形成切削刃的过程^[11]。

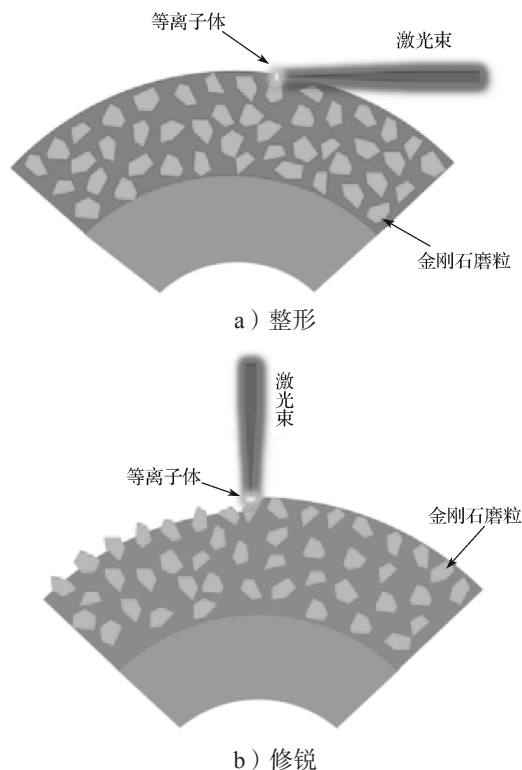


图2 金刚石砂轮整形、修锐示意图

Fig. 2 Schematic diagram of diamond grinding wheel shaping and sharpening

影响金刚石砂轮整形及修锐效果的因素较多。首先,砂轮表面的材料吸收光束能量的充分度与激光行进的进给速度及光束在砂轮表面停留时间密切相关,进给速度越小,停留时间越长,砂轮表面材料的光束吸收率则越高,反之则光束的吸收率越小。其次,在一个脉冲循环内,脉冲激光烧蚀占用的时间与整个工作周期的比值(即占空比),将直接影响激光脉冲峰值和导通时间,对修整效果会产生不同程度的影响^[12],即占空比决定了砂轮表面的粗糙度和修锐效果,占空比愈大,砂轮表面愈粗糙,修锐效果愈好。再次,激光辐射频率对砂轮表面粗糙度和修锐效果的

影响也不容小觑, 砂轮表面粗糙度会随着频率的增大趋于平滑, 修锐效果也会变差。除此之外, 还有光斑重叠率^[13-14]、光斑直径、离焦量以及脉冲强度等激光参数带来的影响还有待研究。

图3为激光修整金刚石砂轮装置的示意图。当高能量密度的激光束辐射砂轮表面时, 激光能量能在极短的时间内使烧蚀区域内的砂轮材料瞬间受热熔化、气化。金属结合剂开始气化后, 激光仍继续提供能量, 这时金属蒸汽被继续强烈加热, 气化效应变得更加剧烈, 同时出现高温等离子体, 产生的等离子体冲击波会沿着激光束的入射方向喷出, 其反作用力作用于砂轮表面, 为熔融材料从烧蚀区域排出提供了强大的驱逐力, 使激光烧蚀区域的熔融材料得到有效去除, 从而获得砂轮所需的加工形状^[15]。

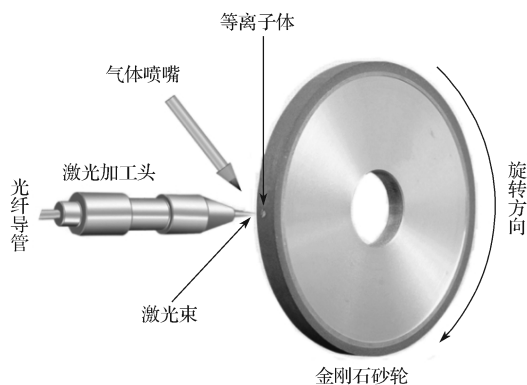


图3 金刚石砂轮激光修整装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of laser dressing device for diamond grinding wheel

一般情况下, 结合剂材料比金刚石更容易被烧蚀熔化, 这不仅因为金刚石熔点高于结合剂熔点, 还因金刚石为绝缘透明材料, 透光性较好, 激光照射到金刚石磨粒表面时, 部分激光被反射, 绝大部分激光将透过磨粒作用于周围的结合剂上, 使结合剂吸收大量的光能从而熔化甚至气化, 金刚石磨粒本身吸收激光的能量较少, 因此金刚石砂轮更易实现修锐。

2 激光修整金刚石砂轮研究现状

金刚石作为自然矿物中硬度最高的非金属材料, 20世纪80年代后期, 被用于砂轮的超硬磨粒, 不仅大大提高了超硬磨料砂轮的使用性能, 而且延长了其使用寿命。超硬磨料砂轮中, 金刚石砂轮使用最为广泛, 其磨削范围几乎覆盖了全部的难加工材料, 包括各种高硬、高脆、高强韧性等材料。

尽管金刚石砂轮具有如此优良的磨削性能, 但砂轮表面的磨粒在磨削加工过程中不可避免地被逐渐磨损、磨钝, 使砂轮工作表面失去正确的几何形状, 砂轮磨削加工精度急剧下降。因此, 为了使金刚石砂轮在磨削过程中能保持几何形状的精准性和磨粒的锐利性, 需要对其进行定期的修整。

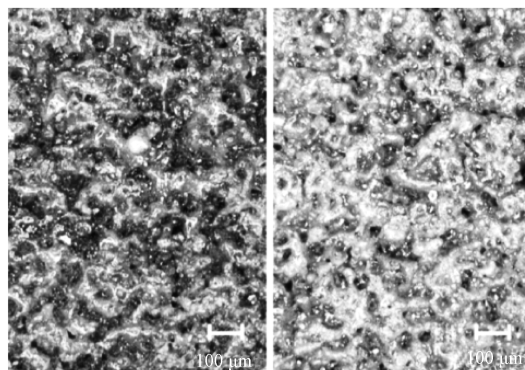
2.1 砂轮修整工艺参数的优化

20世纪80年代, N. Ramesh Babu 等人^[16]率先提出激光修整普通磨料砂轮的概念, 并采用理论和实践相结合的方式, 证明了激光修整普通磨料砂轮是一种切实可行的修整技术; 随后, E. Westkämper^[17]第一次提出将激光技术应用到超硬磨料砂轮的修整中, 这对以后砂轮的精密修整起到推动作用。

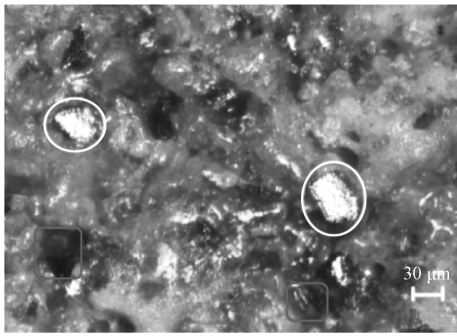
C. Dold 等人^[18]研究了Yb: YAG皮秒级脉冲激光修整电镀金刚石砂轮技术, 并结合磨削实验对比了激光修整和机械修整金刚石砂轮的磨削性能、砂轮表面形貌的艾伯特·费尔斯通曲线 (Abbott Firestone curves) 和粗糙度值, 验证了皮秒级脉冲激光修整超硬磨料砂轮的可行性, 通过优化工艺参数实现了皮秒激光器对金刚石磨粒的高质量无损切割整形。

国内学者李小保^[19]及Min C. Q. 等人^[20]对陶瓷砂轮进行了激光修整试验研究, 对砂轮修整质量影响较大的几个可变参数 (激光功率、重复频率、砂轮转速、激光扫描速度、离焦量) 进行了优化, 获得较为理想的陶瓷基金刚石砂轮修锐表面形貌和磨粒突出高度 (见图4^[19])。

邓辉等人^[21-22]利用脉冲纳秒激光修整粗粒度青铜金刚石砂轮, 通过调整脉冲纳秒激光修整工艺参数, 并对切向整形与径向修锐的方式进行大量实验研究, 结果发现经激光整形后砂轮表面金刚石磨粒的脱落更少, 等高性更好, 出刃高度更合适, 砂轮表面形貌更优良 (见图5^[21])。



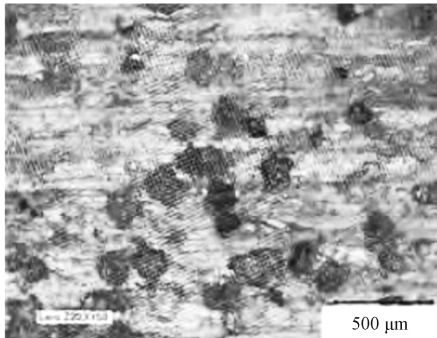
a) 修锐前后砂轮表面形貌 (200倍)



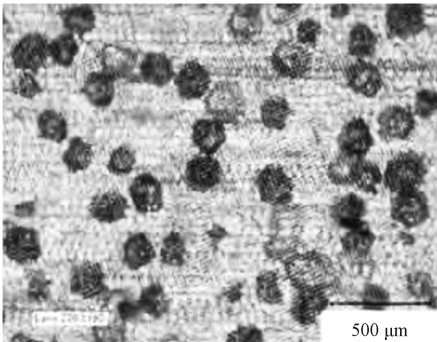
b) 修锐后砂轮表面 (800 倍)

图 4 优化工艺参数修锐砂轮的表面形貌

Fig. 4 Surface shape of the grinding wheel with optimized process parameters



a) 激光修整前



b) 激光修整后

图 5 激光修整前后砂轮表面形貌图

Fig. 5 Topographic maps of the grinding wheel surface before and after laser dressed

2.2 不同砂轮材料的修整研究

不同的结合剂材料以及磨粒材料对激光能量的吸收不同。康仁科等人^[23]为研究激光修整金刚石砂轮的烧蚀机理,通过 Nd: YAG 脉冲固体激光器对青铜树脂为结合剂的金刚石砂轮进行修整试验,同时还对绿碳化硅 (green silicon carbide, GC) 砂轮进行激光修整和机械磨削,探讨烧蚀不同结合剂材料时所对

应的修整参数,并利用扫描电镜观测激光修整后的砂轮表面微观形貌。研究发现激光修整的 GC 砂轮表面的磨粒较突出,容屑空间较大,磨削性能更好。

不同的激光参数会对砂轮材料造成不同的烧蚀效果,不同砂轮材料在受到激光烧蚀所展现的效果也会不同。为了更深入研究激光修整超硬材料砂轮机理,胡榜等人^[24-26]进行了一系列立方氮化硼 (cubic boron nitride, CBN) 砂轮修整试验,证实了脉冲激光修整超硬磨料砂轮的可行性,且砂轮的修锐效果良好。陈根余等人^[27-31]在超硬磨料砂轮激光修整技术的研究和推广等方面做了大量的工作。其中包括:建立了一套基于三角测量原理的激光位移传感器 (光测传感器件),以及高速单片机作为运算处理和控制核心的脉冲激光在线修整超硬磨料砂轮的实时控制系统,运用此系统进行多次不同参数的烧蚀试验,得出激光参数与形变的关系及脉冲激光在线修整技术的机理;首次研究了调 Q Nd: YAG 和光纤激光器修整超硬磨料砂轮技术,运用调 Q Nd: YAG 脉冲激光径向辐照烧蚀青铜金刚石砂轮,实现了金刚石磨粒的无损伤微量去除,激光修整后的砂轮表面形貌较好 (SEM 图^[27]见图 6);通过搭建光路接收系统,研究了激光结合机械的复合修整技术,进一步提高了修整精度,为实现青铜金刚石砂轮精密修整奠定基础。

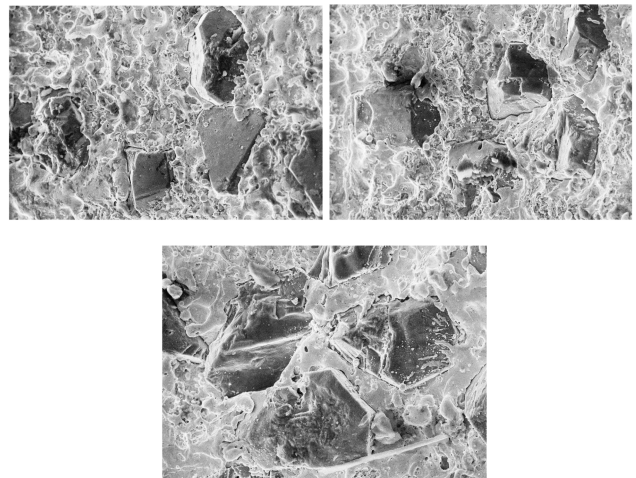


图 6 青铜金刚石砂轮表面形貌 SEM 图

Fig. 6 Bronze diamond grinding wheel surface shape SEM figure

以上对于不同结合剂和砂轮材料的研究,进一步拓展了激光修整技术的应用,也为激光修整金刚石砂轮提供了理论参考。

2.3 激光修整过程及传热模型数值研究

在高能量密度脉冲激光作用下, 砂轮材料的快速加热、熔化与气化、传热传质规律、热物理缺陷层的形成、等离子体冲击波以及熔融物的溅射机理等关键问题, 直接影响激光修整金刚石砂轮的效率与质量。由此可见, 深入研究激光修整金刚石砂轮的机理, 建立完善的激光烧蚀相互作用的数学理论模型, 具有十分重要的作用。激光修整技术涉及高能量短脉冲激光束与超硬磨料砂轮复合材料间复杂的相互作用, 很有必要对激光修整过程进行有限元数值模拟仿真分析, 深入理解修整过程中涉及的复杂物理、化学现象, 揭示激光能量的吸收、传递及转化过程, 全面掌握激光、工艺参数对修整后金刚石砂轮的磨粒变质层、表面形貌、形状精度的影响规律^[32], 进而为实现激光修整技术的高效率、高质量、全自动化提供重要且实用的理论依据和加工参数。

蔡颂等人^[33-35]通过研究脉冲激光去除青铜金刚石表面结合剂的机理, 首次提出修整过程中存在相爆炸现象(如图7^[35])。通过大量实验及理论研究发现, 激光修锐青铜金刚石砂轮发生相爆炸及理想修锐效果的功率密度范围, 以及磨粒与磨粒之间存在适当的容屑空间可以有效避免发生相爆炸。

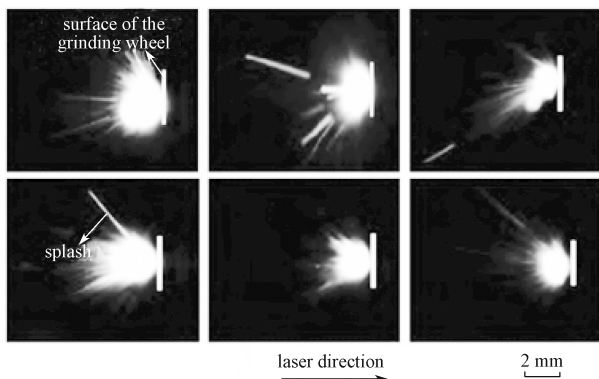


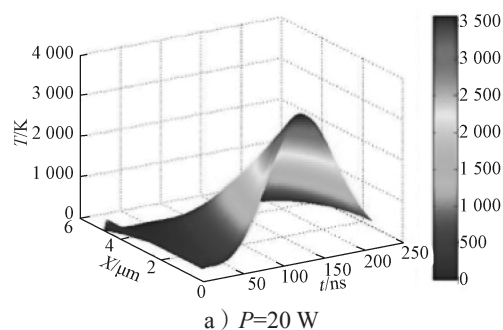
图7 激光修锐砂轮中高速相机拍摄相爆炸图片

Fig. 7 Images of phase explosion taken by a high-speed camera during grinding wheel laser dressing

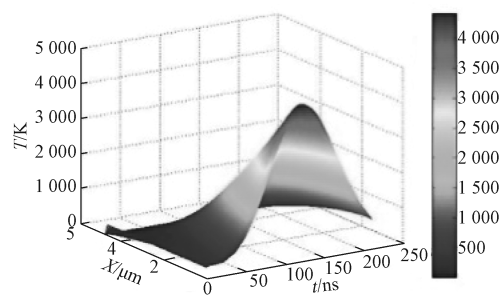
V. Phanindranath 等人^[36]对砂轮修整过程进行建模, 并提出三维不稳定状态热传导模型, 描述了脉冲激光在砂轮表面受到阻塞后在砂轮内部发生的瞬态热现象。综合考虑磨粒和结合剂属性的变化, 利用Nd: YAG 脉冲激光在不同条件下修整砂轮, 并对砂轮内部瞬态温度分布作数值模拟, 计算得到了激光烧蚀凹槽形貌与分布结果。

为了更为深入地研究修整过程中的热传导效应, 陈根余等人^[37]建立了二维瞬态传热数学模型, 并通过实验对比发现, 激光修整过程石墨变质层的影响规律和控制方式, 以及激光修整后的砂轮表层微裂纹、石墨化变质层等缺陷层的产生机理和抑制手段, 对修整参数的选择与优化具有指导意义。Cai S. 等人^[38]基于微观等离子体运动层面, 建立了脉冲激光烧蚀青铜金刚石砂轮传热物理模型, 通过仿真分析砂轮表面温度演变曲线的数值模拟(如图8^[38]), 得到计算的数值与实际实验结果一致, 证实了模型的准确性。

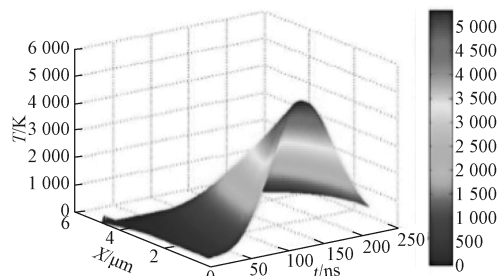
上述研究都只是模拟脉冲激光修整热传导过程, 且对数理模型进行了大量简化, 这对激光修整机理的研究与工艺参数的确定与优化具有一定的指导意义。但是目前对激光修整金刚石砂轮的过程进行数值分析, 仍然存在着模型建立困难、边界条件复杂、计算量较大等难题, 且难以同时考虑传热传质机理、流体动力学特性及等离子体热电离机制等多场耦合问题, 还须对其进行深入探究。



a) $P=20\text{ W}$



b) $P=25\text{ W}$



c) $P=30\text{ W}$

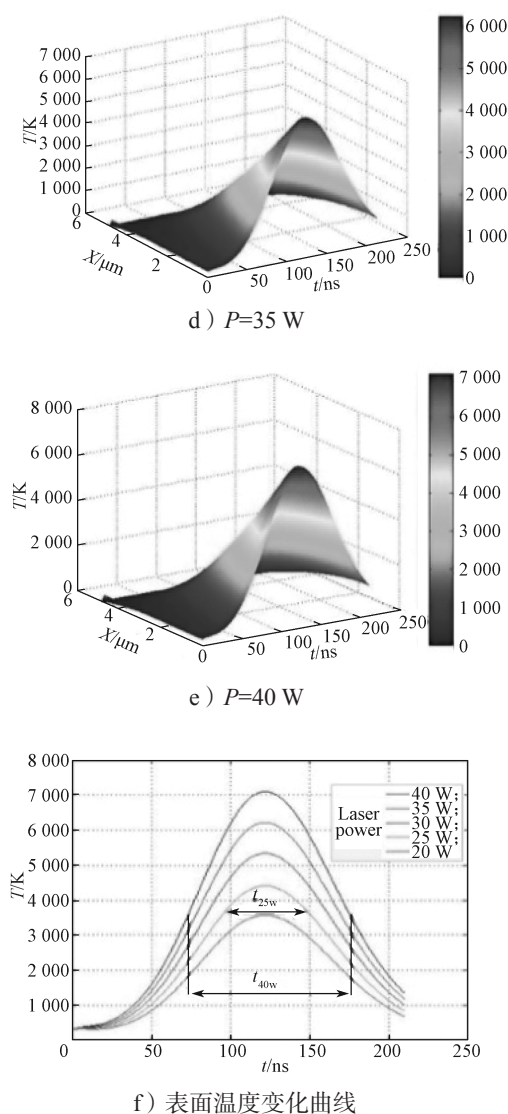


图8 不同激光功率下金刚石砂轮表面的温度变化

Fig. 8 Temperature changes in grinding wheel surface under different laser power



彩图

3 研究展望

激光修整作为新型热加工修整方法,可实现快速、高效、可控修整,能解决金刚石砂轮难以修整的问题。自20世纪80年代以来,激光修整金刚石砂轮得到了快速发展,研究人员先后研发出Nd:YAG激光、Yd:YAG激光、光纤激光和声光调Q YAG脉冲激光等不同类型的激光器,并将其应用于修整各类材料的砂轮中,使修整效果得到极大提升。激光技术的发展解决了长期以来金刚石磨具难以修

整的难题,获得国内外学者的广泛关注。激光修整金刚石砂轮具有广阔的发展前景。

目前,激光修整技术仍然存在着许多技术性难题有待更深层的探讨和研究,如激光修整参数的整合、适配的激光修整控制装备系统、修整系统的技术成本等。

1) 激光修整金刚石砂轮参数的整合及其影响规律还有待完善。不同的修整参数对修整效果有不同影响,例如脉冲频率对修整效果较为明显,频率越高,修整效果越差。若要获得理想的砂轮表面质量,在激光烧蚀金刚石工艺上还需进一步探究。

2) 更为完善的激光自动化控制修整系统。目前,激光修整机理研究是大部分学者的研究重点,但在自动控制设备装置的设计研究方面仍较欠缺,如在加工特殊形貌砂轮时,此时激光烧蚀的热力学特性、加工区域的砂轮表面形貌都瞬息万变,这对激光修整在线监测系统的实时性、稳定性及准确性等方面提出了更加极端的要求。加强对实时检测及计算机控制系统的研究,才能更好实现成套装备系统一体化操作。

3) 投资成本高、后期维护繁琐。将激光修整金刚石砂轮推广至工厂化应用,需要考虑到一次性投资成本高,且后期维护工作相对繁琐的问题。

随着修整技术的不断发展,未来的修整方式需要集激光、机械、电气等多种方法于一体,进行组合型修整才能更好应用于实际,实现实时监测、自动控制一体化发展。激光修整虽比普通修整技术更快速、更准确,但在今后广泛应用的前景下,只有推动激光修整朝着适用范围更广、更经济高效、更节能环保的方向发展,才能实现优化质量、降低成本、提高效率的目的。

参考文献:

- [1] 焦 锋,李成龙,牛 赢,等. 砂轮修整技术研究现状与展望[J]. 中国机械工程, 2021, 32(20): 2435-2448.
JIAO Feng, LI Chenglong, NIU Ying, et al. Review and Prospect of Grinding Wheel Dressing Technique[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(20): 2435-2448.
- [2] 王 艳,胡德金,邓琦林,等. 金刚石砂轮的激光修整技术[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(7): 1069-1072.

- WANG Yan, HU Dejin, DENG Qilin, et al. Study on Laser Truing and Dressing of Diamond Grinding Wheels[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(7): 1069-1072.
- [3] 冯克明, 赵金坠, 邢 波. 超硬磨料砂轮修整技术综述与展望 [J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(2): 115-121.
- FENG Keming, ZHAO Jinzhui, XING Bo. Review and Prospect of Dressing Technology of Superhard Abrasive Grinding Wheel[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(2): 115-121.
- [4] 傅文宏, 邓琦林, 胡德金. 金刚石砂轮的激光修整技术研究 [J]. 机械, 2004, 31(4): 16-18.
- FU Wenhong, DENG Qilin, HU Dejin. Research on Laser Dressing Technology of Diamond Grinding Wheel[J]. Machinery, 2004, 31(4): 16-18.
- [5] 崔仲鸣, 赫青山, 冯创举, 等. 超硬磨料磨具修整技术研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2016, 36(1): 43-49.
- CUI Zhongming, HE Qingshan, FENG Chuangju, et al. Study on Dressing Technology of Super Abrasive Products[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2016, 36(1): 43-49.
- [6] 孙康健, 陈根余, 余春荣, 等. 砂轮激光修整设备及参量选择的研究 [J]. 激光技术, 2011, 35(6): 721-724, 733.
- SUN Kangjian, CHEN Genyu, YU Chunrong, et al. Selection of Equipment and Parameters Used in Laser Truing and Dressing Grinding Wheels[J]. Laser Technology, 2011, 35(6): 721-724, 733.
- [7] 王家金. 激光加工技术 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1992: 4-10.
- WANG Jiajin. Laser Processing Technology[M]. Beijing: China Metrology Press, 1992: 4-10.
- [8] 张端明. 脉冲激光沉积动力学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 299-304.
- ZHANG Duanming. Principles of Pulsed Laser Deposition Kinetics[M]. Beijing: Science Press, 2011: 299-304.
- [9] 蔡 颂, 陈根余, 周 聪, 等. 多脉冲激光修整青铜金刚石砂轮的表面变质层 [J]. 中国激光, 2017, 44(12): 45-55.
- CAI Song, CHEN Genyu, ZHOU Cong, et al. Multi-Pulsed Laser Truing and Dressing of Deterioration Layer on Bronze-Bonded Diamond Grinding Wheel Surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 45-55.
- [10] 左敦稳, 河野良弘, 山下俊一, 等. 金刚石砂轮的CO₂ 脉冲激光修锐研究 [J]. 机械工程学报, 1999(2): 42-45.
- ZUO Dunwen, KAWANO Yoshihiro, YAMASHITA Toshikazu, et al. Effect Of CO₂ Pulsed Laser Scanning on Diamond Wheel Pieces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 1999(2): 42-45.
- [11] 周远航. 超快激光精密修整管螺纹梳刀砂轮关键技术研究 [D]. 温州: 温州大学, 2020.
- ZHOU Yuanhang. Research on Key Technology of Ultra-Fast Laser Precision Dressing Pipe Thread Comb Grinding Wheel[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2020.
- [12] 李玉庆, 王永宝, 胡玉峰, 等. 电镀超硬磨料砂轮修整技术现状与展望 [J]. 超硬材料工程, 2020, 32(2): 33-38.
- LI Yuqing, WANG Yongbao, HU Yufeng, et al. Present Situation and Prospect of Dressing Technology of Electroplated Superabrasive Grinding Wheels[J]. Superhard Material Engineering, 2020, 32(2): 33-38.
- [13] 刘健平, 陈根余, 周 聪, 等. V形凹面青铜金刚石砂轮脉冲激光修整试验研究 [J]. 应用激光, 2017, 37(4): 557-562.
- LIU Jianping, CHEN Genyu, ZHOU Cong, et al. Experimental Study on Pulsed Laser Dressing Bronze Diamond Wheel V-Shaped Concave Surfaces[J]. Applied Laser, 2017, 37(4): 557-562.
- [14] 刘健平. 脉冲激光修整V形凹面青铜金刚石砂轮试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- LIU Jianping. The Research on Dressing of V-Shaped Concave Bronze-Bonded Diamond Wheels with Different Pulsed Laser[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [15] 王清辉, 唐亚新, 徐家文. 特种加工在修整金刚石磨轮中的应用 [J]. 航空精密制造技术, 1995, 31(4): 15-17.
- WANG Qinghui, TANG Yaxin, XU Jiawen. Application of Special Machining in Dressing Diamond Grinding Wheel[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1995, 31(4): 15-17.
- [16] RAMESH BABU N, RADHAKRISHNAN V, MURTI Y V G S. Investigations on Laser Dressing of Grinding Wheels Part I: Preliminary Study[J]. Journal of Engineering for Industry, 1989, 111(3): 244-252.
- [17] WESTKÄMPER E. Grinding Assisted by Nd: YAG Lasers[J]. CIRP Annals, 1995, 44(1): 317-320.
- [18] DOLD C, TRANSCHEL R, RABIEY M, et al. A Study on Laser Touch Dressing of Electroplated Diamond Wheels Using Pulsed Picosecond Laser Sources[J]. CIRP Annals, 2011, 60(1): 363-366.
- [19] 李小保. 光纤激光修整陶瓷基金刚石凸圆弧面砂轮试

- 验研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- LI Xiaobao. The Experimental Research of Fiber Laser Dressing Convex Arc Surface on Vitrified Bond Diamond Wheel[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [20] MIN C Q, LI Q S, YANG X B, et al. Trimming for Alumina-Based Ceramic Casting Cores for Turbine Blade by Double Picosecond Laser Scanning[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2020, 30(9): 095014.
- [21] DENG H, CHEN G Y, ZHOU C, et al. Processing Parameter Optimization for the Laser Dressing of Bronze-Bonded Diamond Wheels[J]. Applied Surface Science, 2014, 290: 475-481.
- [22] 邓辉, 陈根余, 周聪, 等. 脉冲激光切向整形径向修锐青铜金刚石砂轮[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103003.
- DENG Hui, CHEN Genyu, ZHOU Cong, et al. Pulsed Laser Tangential Profiling and Radial Sharpening of Bronze-Bonded Diamond Grinding Wheels[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 1103003.
- [23] 康仁科, 史兴宽, 任敬心, 等. 激光修整金刚石砂轮的研究[J]. 西北工业大学学报, 1999, 17(4): 624-628.
- KANG Renke, SHI Xingkuan, REN Jingxin, et al. On Dressing of Diamond Grinding Wheels by Nd: YAG Lasers[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1999, 17(4): 624-628.
- [24] 胡撈. 皮秒激光修整平形电镀 CBN 砂轮试验研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- HU Bang. An Experimental Study on Picosecond Laser Dressing of Parallel Electroplated CBN Grinding Wheel[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [25] 王续跃, WU Y B, 徐文骥, 等. 激光修整圆柱形 CBN 砂轮中偏焦量对能量分布的影响[J]. 中国机械工程, 2006, 17(7): 702-705.
- WANG Xuyue, WU Y B, XU Wenji, et al. Effect of Focal Offset on Energy Distribution in Laser Truing Grinding Wheel[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(7): 702-705.
- [26] 王续跃, 吴勇波, 王军, 等. 激光入射角对修整圆柱形 CBN 砂轮影响[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(5): 672-675.
- WANG Xuyue, WU Yongbo, WANG Jun, et al. Effect of Incident Angle on Laser Processing of a Small Vitified CBN Grinding Wheel[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(5): 672-675.
- [27] 陈根余, 陈国桂, 黄孔, 等. 激光修整青铜金刚石砂轮精度研究[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1278-1281.
- CHEN Genyu, CHEN Guogui, HUANG Kong, et al. Study on the Accuracy for Laser Truing and Dressing of Bronze-Bonded Diamond Wheels[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(5): 1278-1281.
- [28] 陈根余. 声光调 Q Nd: YAG 脉冲激光修整青铜金刚石砂轮机理及技术研究[D].长沙:湖南大学,2006.
- CHEN Genyu. The Research on Mechanism and Technology for Laser Truing and Dressing of Bronze-Bonded Diamond Grinding Wheels by Acoustic-Optic Q-Switched Nd: YAG Pulsed Laser[D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [29] CHEN G Y, CAI S, ZHOU C. On the Laser-Driven Integrated Dressing and Truing of Bronze-Bonded Grinding Wheels[J]. Diamond and Related Materials, 2015, 60: 99-110.
- [30] CHEN G Y, MEI L F, ZHANG B, et al. Experiment and Numerical Simulation Study on Laser Truing and Dressing of Bronze-Bonded Diamond Wheel[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(3): 295-304.
- [31] 陈根余, 周兴才, 周聪, 等. 树脂结合剂 CBN 砂轮光纤激光径向修锐及磨削实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203008.
- CHEN Genyu, ZHOU Xingcai, ZHOU Cong, et al. Experimental Research on Fiber Laser Radial Sharpening of Resin Bonded CBN Grinding Wheels and Grinding Characteristics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0203008.
- [32] 蔡颂, 熊彪, 陈根余, 等. 青铜金刚石砂轮的激光整形与修锐[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 66-75.
- CAI Song, XIONG Biao, CHEN Genyu, et al. Laser Truing and Sharpening of Bronze-Bond Diamond Grinding Wheel[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(4): 66-75.
- [33] 蔡颂. 脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮机理研究[D].长沙:湖南大学,2016.
- CAI Song. The Research on Mechanism for Laser Truing and Dressing of Bronze-Bonded Diamond Grinding Wheels by Pulse Optical Fiber Laser[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [34] CAI S, CHEN G Y, ZHOU C, et al. The Mechanism and Application of Bronze-Bond Diamond Grinding Wheel Pulsed Laser Dressing Based on Phase Explosion[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(9/10/11/12): 1641-1653.
- [35] 蔡颂, 陈根余, 何杰. 脉冲光纤激光修锐青铜金

- 刚石砂轮相爆炸研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0906002.
- CAI Song, CHEN Genyu, HE Jie. Studies on the Phase Explosion of Laser Dressing Bronze-Bond Diamond Grinding Wheel by a Pulsed Fiber Laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0906002.
- [36] PHANINDRANATH V, RAMESH BABU N. A Theoretical Model for Prediction of Groove Geometry on Laser Dressed Grinding Wheel Surface[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36(1): 1-16.
- [37] 陈根余, 余春荣, 李时春, 等. 脉冲激光修整青铜金刚石砂轮温度场的模拟与试验[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0703002.
- CHEN Genyu, YU Chunrong, LI Shichun, et al. Temperature Field Simulation and Experiment for Truing and Dressing of Bronze-Bonded Diamond Grinding Wheel with Pulsed Laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(7): 0703002.
- [38] CAI S, CHEN G Y, ZHOU C. Research and Application of Surface Heat Treatment for Multipulse Laser Ablation of Materials[J]. Applied Surface Science, 2015, 355: 461-472.
- (责任编辑: 李玉华)

Research Progress of Laser Dressing Diamond Grinding Wheels

CAI Song^{1,2,3}, ZHANG Yang², LONG Saiqiong⁴, LIU Wenhao¹, MING Xingzu¹

(1. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Green Fan Manufacturing Collaborative Innovation Center in Hubei Province, Wuchang Institute of Technology, Wuhan 430065, China; 3. School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. Guangzhou Customs Technology Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: Diamond grinding wheels play a pivotal role in the field of grinding. For the stop loss of failed diamond grinding wheels, choosing a reasonable dressing method for them has become a major problem. Laser dressing technology integrates optical, electrical, thermal, mechanical and other methods, which can effectively realize the dressing of diamond grinding wheels, and has attracted great attention from many scholars from home and abroad. The basic principles of laser dressing diamond grinding wheels are described, with the research status of laser dressing technology analyzed, and the future development of laser dressing diamond grinding wheels prospected.

Keywords: laser technology; diamond grinding wheels; laser dressing; plasma